



TITLE:

# 建築部材としての合板の研究とその利用

AUTHOR(S):

満久, 崇麿

---

CITATION:

満久, 崇麿. 建築部材としての合板の研究とその利用. 木材研究: 京都大学木材研究所報告 1966, 38: 1-20

ISSUE DATE:

1966-07

URL:

<http://hdl.handle.net/2433/52990>

RIGHT:

## 建築部材としての合板の研究とその利用

満 久 崇 磨\*

Takamaro MAKU\*: Studies and Uses of Plywood as the Construction Members

木材の弾性に関する研究は、19世紀の初期にすでにはじめられていたが、木材が直交異方的な性質をもつという考え方が確立してきのは、1830年代に SAVART<sup>1)</sup> が繊維に対して、いろいろの角度で切った円板の振動実験からであるとされている。その後約100年の間に、多くの研究者によつて、弾性理論の確立、より正確な弾性定数の測定法、定数に關与する諸因子の影響などについて、研究や実験が行なわれ、直交異方性均質体としての多くの資料が集積され、木材の力学的性質が次第に明かになってきた。

1930年代にはいと、木材の2次元応力問題の研究が活発となり、有孔板や節、切り欠きをもつ板などの応力分布に關する理論解や実験結果が報告され、ようやく實際面とのつながりをもつようになってきた。

このように素材についての力学的性質が明かになるにしたがい、1920年頃から合板についての研究も次第に急速な進歩をみせ、多くの研究報告が出されているが、これら初期における理論的取扱いは1944年 MARCH<sup>2)</sup> により、また歴史的な解説は HEARMON<sup>3)</sup> によりほぼ集約されている。

合板の2次元応力問題について、最初に理論的に取り組んだ主な人々としては PRICE<sup>4)</sup>, BALABUCH<sup>5)</sup>, MARCH<sup>6)</sup>, SMITH, C. B.<sup>7)</sup>, SMITH, R. C. T.<sup>8)</sup> などをあげることができるが、厳密な理論解は、極めて簡単な条件の場合に限られ、実用上重要な問題の多くは、たとえば strain energy method などの近似解として与えられている。

いずれにしても、合板その他木質材料の弾性定数の決定や、板の撓み、曲げ、あるいは座屈などにおける問題点は、等方体に比較して弾性定数の数が多く、理論解がごく限られた簡単な場合しか求められないこと、また材料の性質のバラッキが大きいこと、実際の境界条件が数学的表現とかなり食い違うことなどのために、理論と實際にかなり開きがある場合が多いことである。木質材料を取扱う場合には、とくにこれらの点について深い考慮を払う必要がある。

さて建築部材として合板を眺めた場合、当然上に述べた広い範囲の問題が關連するが、本文では主として合板および合板を主材とする各種の複合材料の設計値の決定に最も關係が深いにもかかわらず、わが国ではあまり取扱われていない座屈に關する従来の研究の概要とこれら複合材料の發展の歴史を眺めてみることにする。

### I 合板パネルの座屈

座屈とは板の平面に沿つて力が働くとき、それがある大きさに達すると板の平面が不安定に

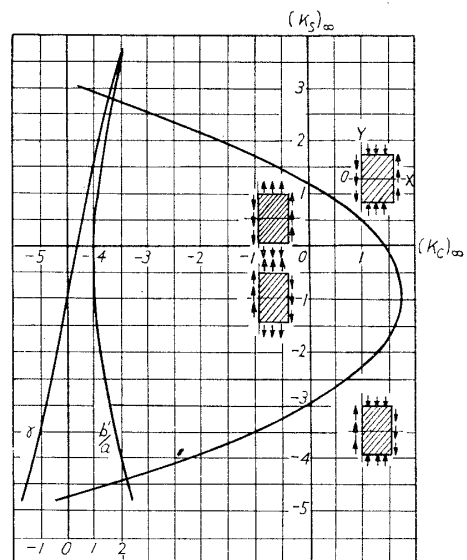
\* 木質材料研究部門 (Division of Composite Wood)

なつて、小試片の場合に比較してはるかに低い力で破壊する現象である。合板の座屈は後出の stressed skin panel, sandwich panel, plywood gusset, box beam web などの設計値を決定するための重要な要素であるが、これについて最初にまとめた論文を出したのは BALABUCH<sup>5)</sup> であるとされ、その後1940年代にかけて欧米の多くの研究者によつて座屈問題が取扱われている。この内最も注目されるのはアメリカの林産試験場で行われた一連の理論および実験的研究であろう。これは当時、木製飛行機の設計資料を早急に求めねばならぬという必要にせまられていたとはいえ、座屈という面倒な実験にとりくんだ、有効かつ組織だつた研究体制には、20年後の今日なお我々の学ぶべき多くのものが含まれているからでもある。まず1942年 MARCH<sup>9)</sup> は等方体における TIMOSHENKO の式<sup>10)</sup>を応用して表層繊維が1辺に平行および直交する矩形合板と 45° に傾斜する無限に長い合板が、それぞれその周辺に沿う均一な圧縮またはせん断力をうける場合、また無限に長い合板が圧縮とせん断の組み合わせ応力をうける場合の限界座屈応力の理論式を導き、種々の周辺支持条件における座屈係数の図表を各種構成の Douglas fir 合板について求め、1943年にこれを任意の表層繊維角度に拡大した。同じ年 NORRIS ら<sup>12)</sup> は birch, yellow poplar, spruce 合板の表層繊維が 0° および 90° の場合について、March の圧縮理論式が比較的良好に実際と一致することを確かめると共に、座屈後における矩形合板の effective width ratio を求めている<sup>13)</sup>。一般に平板では最初の座屈後、なほしばらくは座屈荷重が増加するが、この最大座屈応力を effective ultimate stress, これが平板の破壊応力に対する比を effective width ratio と呼び、いずれも設計値を定める上に重要な数値である。彼等は更に表層繊維が任意の角度で傾斜する場合の圧縮無限板の座屈係数から有限板のそれを算出する曲線を作製している<sup>14)</sup>。

1945年 Voss ら<sup>15)</sup> は yellow poplar や spruce 合板の表層繊維が 0°, 90°, または  $\pm 45^\circ$  の矩形合板のせん断座屈試験を行ない、March の理論式が実験とかなりよく一致することを確かめ、無限板のせん断座屈係数から有限矩形板のそれを算出するための図表や effective ultimate stress を求めるための曲線を決定した。これと時期を同じくして NORRIS ら<sup>16)</sup> は種々の表層繊維角に対する圧縮荷重の effective width ratio 算出のための曲線を求め1943年の図表<sup>12)</sup>を補充完成した。

続いて1949年 RINGELSTELLER<sup>17)</sup> は荷重辺固定、他辺単純支持の 45° 傾斜矩形合板が圧縮荷重をうけた場合について、無限板座屈係数から有限板のそれを求める図表を決定している。

いろいろの合板構成、表層繊維角、組合せ応力および周辺支持条件に応じて、それぞれの座屈係数を計算することはきわめて煩雑なために、最後に実用上の便をはかつて、合板構成が 2~9 プライと無限プライ (9 プライ以上に適用)、表層繊維角 0, 15, 30, 45, 60, 75 および、90°, 周辺固定および単純支持、荷重条件圧縮およびせん断の組合せの各場合



第1図 5プライ (1:1:1:1:1)、表層繊維がエッジに傾斜した場合の矩形合板の座屈係数、圧縮、せん断複合荷重、周辺単純支持<sup>18)</sup>。

について図表が総括されている<sup>18)</sup>。これらは Douglas fir 合板の弾性定数にもとづいて決定されているが、他の針葉樹合板に対しても近似的に適用することができる。第1図はその1例である。

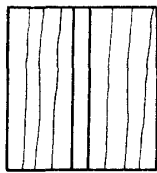
厚さ 7~12mm の手頃な構造用合板では 3 プライと 5 プライの何れを選ぶべきかは實際上重要な問題であるが、Whyte<sup>19)</sup> はこれについて針葉樹合板の試験結果から

- (1) 3 プライが 5 プライより剛性が高く、曲げ強度も 16% 大きい
- (2) 表面に沿う寸法安定性は 5 プライがすぐれている。
- (3) Diaphragm strength (後出) はむしろ釘打ちなどの施工法に支配され、3 プライ、5 プライの差は無い
- (4) 値段は 3 プライが約 10% 安い

ことなどを結論している。また design value として重要な rolling shear に関するわが国の研究報告としては大熊<sup>20)</sup>のそれがある。

## II Stiffener (補剛材) をもつ合板パネルの座屈

矩形合板の座屈荷重は、第2図のように辺に直角に角材を接着すると著しく増加する。この角材を stiffener (補剛材, 補強材) とよび、これによつて付加される



第2図

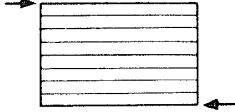
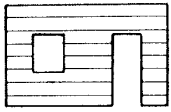

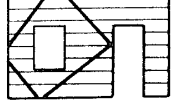

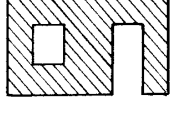

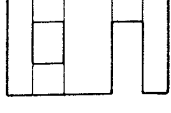
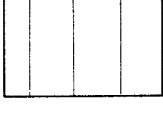

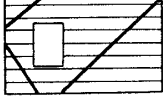
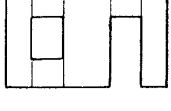
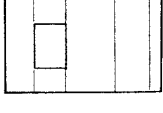


剛性は stiffener 自体のそれよりはるかに大きい。この種の補剛平面部材の座屈荷重を求めるには、まず stiffener による付加剛性を求める必要があるが、これについての研究は比較的少ない。1946年 SMITH ら<sup>21)</sup> は直交異方体としての合板に水平 stiffener を接着した場合の付加剛性を理論的に求め、yellow birch, yellow poplar 合

板に Sitka spruce の stiffener を接着したパネルについて多くの実験を行ない、理論式が実験と非常によく一致することを確認している。

荷重辺が単純支持され、圧縮荷重をうける矩形合板の中央に 1 本の stiffener が水平に接着された場合、このパネルは stiffener の剛性の大小によつて、1 個の半波長または 2 個の半波長で座屈する。HEEBINK ら<sup>22)</sup> はこのタイプのパネルの上記 2 種の座屈荷重をエネルギー法によつて求め理論近似解を与え、yellow birch 合板、Sitka spruce stiffener のパネルについて座屈試験を行ない理論式を修正し、さらに表層繊維が 45° 傾斜する場合<sup>23)</sup>についても多くの実験を行なっている。

1 本の垂直の stiffener をもち、表層繊維が 0 または 90° の矩形合板のエッジに圧縮力が作用する場合、stiffener が曲がらないで、パネルが座屈するための最小の stiffener をもつパネルの限界座屈応力および付加剛性に対する近似理論解は、それぞれ SMITH ら<sup>24)</sup>によつて 1947 年に導出され、このような critical stiffness をもつ stiffener の厚さを求める式も見出されている。彼らはまた、種々の stiffened panel の座屈試験を行なった結果、必要な剛性をうるためには理論値に 2 倍の係数をかける必要があることを見出し、これは主としてパネルの initial flatness に起因するものであると考えている。翌 48 年 NORRIS ら<sup>25)</sup>は表層繊維が 45° 傾斜する場合の付加剛性の計算式を与えているが、これによると限界寸法の stiffener の接着によつて合板パネルの座屈荷重は約 4 倍に増加することになる。

		相対的 剛 性	相対的 強 度		相対的 剛 性	相対的 強 度
	1×8'' 水平羽目 2×2.5'' 釘 打	1.0	1.0		1×8'' 水平羽目 2×2.5'' 釘 打 窓, 出入口	0.75 0.75
	1×8'' 水平羽目 2×2.5'' 釘 打 1×4'' 筋 か い	2.6	3.6		1×8'' 水平羽目 2×2.5'' 釘 打 1×4'' 筋 か い	1.5 2.2
	1×8'' 水平羽目 2×2.5'' 釘 打 1×4'' 筋 か い	4.2	3.5		1×8'' 傾斜羽目 2×2.5'' 釘 打	1.0 1.3
	1×8'' 傾斜羽目 2×2.5'' 釘 打	4.3	8		25/32'' ファイバボード 2.5'' 釘 打 エッジ 3'' 間隔 その他 5½~6'' 間隔	1.6 2.1
	1/4'' 合 板 2'' 釘 打 エッジ 5'' 間隔 間柱 10'' 間隔	4.2	5.2		1/4'' 合 板 2'' 釘 打 エッジ 5'' 間隔 その他 10'' 間隔	2.0 2.8
	1×8'' 水平羽目 2×2.5'' 釘 打 1×4'' 筋 か い	3	—		1/4'' 合 板 フレーム接 着	3.7 4.0
	1/4'' 合 板 窓	3.5	3.7			

第3図 せん断荷重をうける各種木造壁体の強度と剛性<sup>27) 28)</sup>

密に平行に並んだ stiffener をもつ矩形合板が周辺に圧縮またはせん断荷重をうけた場合の critical stress については、1948年 NORRIS ら<sup>23)</sup> によつて合板の弾性定数の代りに stiffened panel 自体の弾性定数を用いれば相当の精度をもつて利用しうることが明かにされた。

この種のパネルは stressed skin panel と共に、住宅の耐力壁、床パネル、屋根パネルとして利用範囲が広く、その座屈荷重の算定は上記のパネル類の設計上重要なものである。これらの研究の進展によつて、box beam や stressed skin panel, sandwich panel の design value が決定され、木構造建築の unit member としての新市場を開拓し、いわば構造用合板利用の第2期にはいつたと見ることが出来よう。すなわち1940年代の末期である。

Stiffened plywood panel 関係の実験はあまり見当たらないが、座屈理論以前の実物大の壁体の実験としては、古く1934年に TRAYER<sup>27)</sup> が行なつた実験がある。これは yellow pine の間柱に厚さ 1/4~3/8" の合板を接着または釘打ちした 4'×8', 8'×12' のパネルに平面内せん断力を与えた時の剛性と強さを測定した簡単な実験で、その結果を厚さ 1", 巾 8" の yellow pine の sheathing board を水平または斜め張りした場合、筋かいの有無、窓や出入口など開放部の有無、釘の間隔など種々の条件をかえた壁体のそれ<sup>28)</sup>と比較して第3図に示す。これを見ると合板下地板がいかに秀れているかがよく判る。この頃が構造用合板利用のいい時期ということが出来よう。

1964年3月アラスカのアンカレッジを襲つたマグニチュード8.6という大地震において家屋、人畜の被害は意外なほど軽少であつた。これは同市の建築条令によつて木造家屋の耐震構造が固くまもられていたためで、地震直後政府派遣の木造住宅被害調査団の調査結果<sup>29)</sup>によると、土台、筋かい、床、屋根が適当に結合され、下地板が充分注意して釘付けされていた木造家屋は非常に剛性にとみ、とくに合板の接着下地板ははずぬけて強かつたことが報告されている。同年6月の新潟地震でも木造住宅は比較的安全であつたように報告されているが、実際にはかなりの被害をうけ、地割れや局部陥没を起した所では基礎の不同沈下による上部構造の破損が多かつたようである<sup>30)</sup>。わが国では一般に北米のような sheathing 工法をとりいれていない



写真1 Sheathing が無いため基礎の不同沈下で上部構造が破損した木造家屋<sup>29)</sup>  
(アラスカ地震)(日本の木造住宅にはこの種の構造が多い)

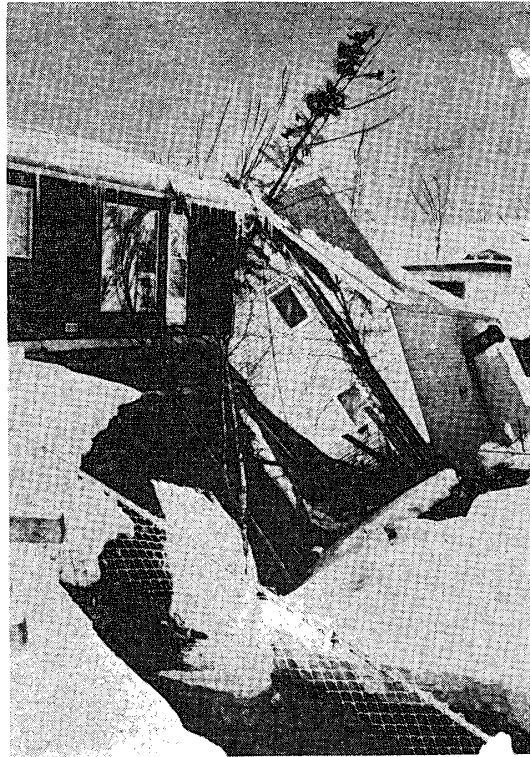


写真2 合板サイディングを張っていたため、地盤陥没によつて15呎落こんだが、建物自体はほとんど損傷しなかつた木造家屋<sup>29)</sup> (アラスカ地震)

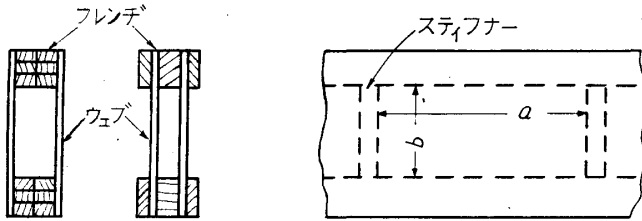


写真3 地回り地帯で前方の木造家屋はほとんど破損していないが、後方のリフトスラブ式コンクリートビルは崩壊した<sup>29)</sup> (アラスカ地震)

から各部材間の結合には充分注意を払い強固にする必要がある (写真1～3)。

### III Box Beam

Box beam は第4図にその断面を示すように、1枚以上の垂直合板 (ウェブ) の上下に素材または集成材 (フレンジ) を接着したビームで、曲げ応力をフレンジ、せん断応力をウェブで負担させる部材であり、断面の形により I-ビームとも呼んでいる。したがつてウェブのせん

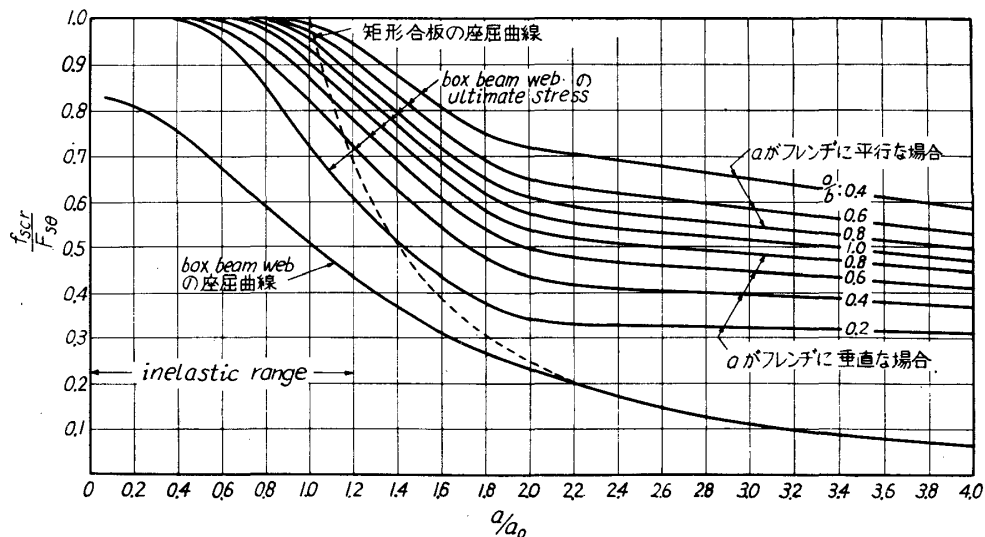


第 4 図

断座屈が 1 つの設計基準になり，ビームの高さと beam stiffener の間隔を仮定すれば合板のせん断座屈式からこれを求めることができる。Box beam の設計値決定のための諸研究の中で最も注目されるのは，やはりアメリカ林産試験場にお

けるそれであろう。この場合も又，木製翼桁に関する資料の必要性にせまられていたとはいえ，1943年から44年にかけて，長さ 10' 以上の box beam が実に百数十本も実験に使用されるという強力なものであった。

まず LEWIS ら<sup>31)</sup>はフレンジに Sitka spruce の集成材を，ウェブには yellow poplar 3 プライ合板を，その表層繊維が梁軸に 45° に傾斜するように接着した種々のサイズの box beam について，ウェブの座屈試験を行ない，相当する合板の理論座屈曲線と比較した。第 5 図がそ



第 5 図 合板ウェブの座屈応力と ultimate stress<sup>31)</sup>

の例で点線は合板パネルの計算値，下部の実線が box beam ウェブの実験曲線で実験値の下限に沿ってえがかれたものである。 $a/a_0 < 2.2$  では実験値が理論値よりかなり下側すなわち危険側にある事には注意を要する。ビームの場合ウェブの周辺支持条件が理論的なそれとかなりくい違うこと，ウェブが完全な平面でないことなどがこのくい違いの主な原因と考えられる。

この実験結果から一般に  $a/a_0 < 1.2$  のウェブでは最初の座屈後すぐウェブ破壊をおこすが， $a/a_0 > 2.2$  のウェブでは最初の座屈発生後破壊までより大きな荷重にある期間たえることが実証された。前者を inelastic buckling range，後者を elastic buckling range とよぶ。LEWIS らはまたウェブの ultimate stress をウェブの表層繊維が梁軸に 45° に傾斜する場合<sup>32)</sup>，垂直および平行の場合<sup>33)</sup>について各種の box beam に対して求めた。図中の 8 本の曲線群がそれで，このグラフは 1952 年に再確認された<sup>34)</sup>。またウェブの座屈曲線は繊維角度が 0°，45° および 90° のいずれの場合にも適合するが，ultimate stress の曲線群が 0°，90° の場合に適合するか否かは資料不足のため保留されている。Box beam の実際の設計にあたってウェブの座屈を



防止し、その ultimate strength を発揮させるために必要な stiffener space を求めるグラフがこれらの資料から作製されている。LEWIS ら<sup>35)</sup>はさらに Douglas fir 3 プライ合板、45° 張りウェブをもつ種々の box beam に inelastic buckling を繰返し与えた後、これがビームの曲げ強度に与える影響を調べた結果、ウェブの座屈は繰返し数の増加と共に増大すること、40 回の繰返し後におけるビームの曲げ強度が、コントロールのその80~99%に達することを明らかにした。

以上は何れも合板ウェブの座屈に関する研究であるが、LEWIS ら<sup>36)</sup>は tension flange で破壊するように設計された box beam の tension flange に存在するボルト孔や compression failure, あるいは繊維走向角などのビームの曲げ強度におよぼす影響につき報告し、高見ら<sup>37)</sup>は歪エネルギー論から box beam の曲げ撓みを理論的に求め、合板ウェブの表層繊維が梁軸に 0, 45および 90° の実物大ビームの実測値が計算値に比較的良好一致することを確認している。合板ウェブの面白い使い方としては Wellstegträger<sup>38,39)</sup> がある。これはフレンジに波形の合板ウェブを垂直に接着した1種の I-ビームで波形はウェブのせん断強度をまし、座屈防止に役立つ特長をもっている。

#### IV Stressed Skin Panel

Stressed skin panel は最近欧米において組立式住宅用として市場を拡大しており、垂直パネルの場合は主として周辺に沿う圧縮力を、屋根または床パネルの場合は主として曲げモーメントをうけもつ部材である。

この設計にはパネル全体について考察する場合もあるが、一般には1つの縦フレームとこれに属する stressed cover からなる I 型断面について行なう場合が多いから、周辺に沿う圧縮力またはせん断力をうける stiffened panel の座屈理論式を適用することが出来る。Stressed skin panel の実物大試験は案外に少ないようであるが、古くは LUXFORD<sup>40)</sup> が合板の座屈理論の確立以前に、yellow pine joist の両面または片面に合板を接着または釘付けした床パネルについて、joist の数、寸法あるいは組合せをかえた場合について曲げ試験を行なっている。

さて現在 stressed skin panel を設計するために採用されている主な方法は、まず上記 I 型断面の cover の有効巾を、この cover が周辺圧縮力をうけた場合座屈しないように定めた後、例えば垂直荷重に対する設計値を定めようとするもので、この有効巾を basic space とよび、縦フレームの内法間隔の限界値とする。合板を cover とする stressed skin panel の basic space については、すでに1940年 NEWLIN<sup>41)</sup> が実用的な式を導出して以来今日まで採用されているが、最近では MÖHLER<sup>42)</sup> らが effective width の値を理論的に追求している。

Stressed skin panel を垂直パネル、屋根パネルあるいは床パネルとした場合の実際にいきな資料をうるためのモデルハウスが作られたのは、おそらくアメリカ林産試験場のそれが最初であろう。これは1935年(1階建)と1937年(2階建)に同試験場内の一隅にたてられたが、後者がほんとうの意味の engineered construction であるとされている。Cover は合成樹脂接着の Douglas fir 合板、フレームも Douglas fir で、両者は耐水性カゼイングルーで接着され、内部にはアスファルトペーパーと保温材がはられ、とくに防湿に注意が払われた。1962年これらのパネルを取外し、実物曲げ試験、合板接着試験、合板フレーム間接着試験などを行

なつた結果によると，上記諸性質は25年間の曝露によつてほとんど劣化せず，今後なお，長期の使用にたえることが実証された。なお取外されたパネルのあとには感圧性合成樹脂接着剤を用いた stressed skin panel がはめこまれ，引続き曝露試験に供されている<sup>43)</sup>。

## V Sandwich panel の座屈

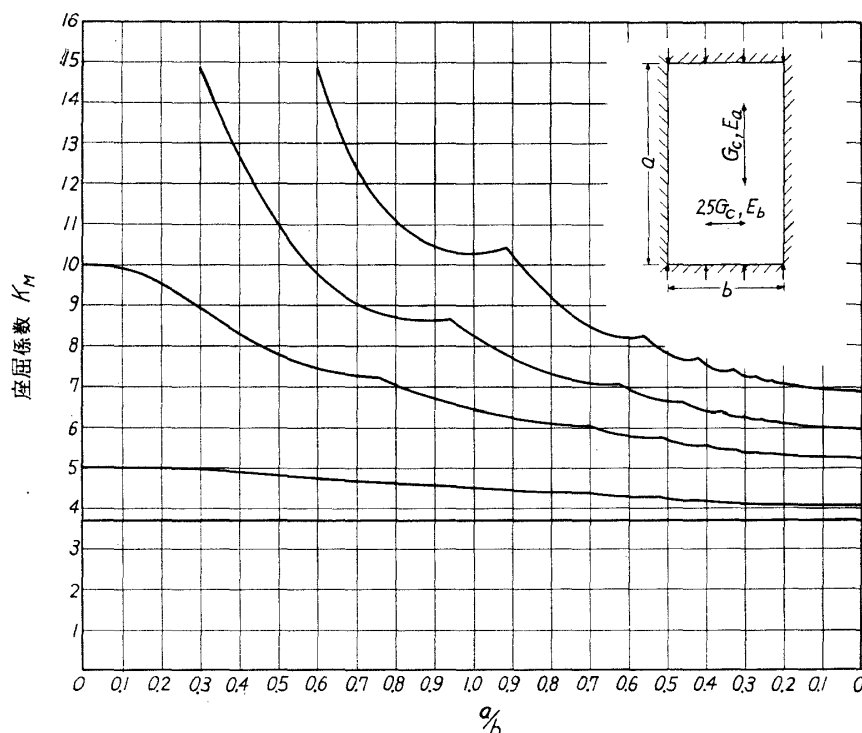
フェイス，コアが異方体からなる sandwich panel の座屈については，そのパネルの弾性定数が判れば合板の座屈理論式がそのまま適用できる。1945年 MARCH ら<sup>44)</sup>は (1) フェイス，コアが共に比例限以下の荷重をうける，(2) コアのせん断変形の影響は無視できる，(3) パネルが座屈する前にフェイスが wrinkle しない，という仮定の下に種々の周辺支持条件について圧縮座屈係数を歪エネルギー法によつて求めた。この場合上述のことから明かなように理論式は先出の合板の座屈における弾性定数の代りに sandwich panel のそれが用いられる。Sandwich panel の定数は構成材料の弾性定数が判つておれば計算できるし，等方体に対しては定数を修正すればよい。MARCH らはまた種々の定数を仮定して，座屈係数の図表を種々の周辺支持条件に対して与えている。

1947年 BOLLER はフェイスがアルミおよび glass cloth 積層板，コアが end-grained balsa, cellular cellulose acetate または paper honeycomb からなる種々の厚さ，サイズのパネルが，種々の条件で支持されている場合の圧縮座屈実験から MARCH の理論式が比例限内では実際と比較的よく一致することを認め，かつ比例限以上の応力またはコアがせん断変形する場合の修正式を与えている<sup>45)</sup>。

Sandwich panel が周辺に沿う圧縮荷重をうけた場合，パネル自体が座屈する前にフェイスが弾性的に不安定となり，いわゆる wrinkle を生じ，その結果パネルの座屈をまねくことがあるが，このパネルに引張応力が組合わされると，当然単純圧縮よりも高い応力で弾性的不安定状態が生ずることが予想される。1949年 BOLLER ら<sup>46)</sup>は almi-face, corkboard-core のパネルのせん断試験を行ない，その結果，フェイスのせん断破壊応力は圧縮破壊応力より平均25%大きい，フェイスが弾性的に不安定になる時のせん断応力はこの圧縮破壊応力にほぼ等しいことをまとめている。この事は sandwich panel がせん断荷重をうけた場合，その圧縮分力によつてフェイスは elastic instability になろうとするが，引張分力によつて拘束されるため，フェイスの圧縮破壊応力値ではフェイスが破壊しないことを意味する。

Edgewise shear をうける sandwich panel の座屈荷重については，1951年 Kuenzi ら<sup>47)</sup>が4辺単純支持，各層共異方体よりなるパネルおよび4辺固定，各層共等方体よりなるパネルの座屈理論式を求め，さらに almi-face, honeycomb または end-grained balsa core の sandwich panel についてせん断座屈実験を行ない，理論式をチェックし，一般に単純支持の場合，コアのせん断変形の影響は無視しても大きな誤差を生じないが，他の周辺支持条件ではこの影響が無視できないことを指摘している。また ERICKSEN ら<sup>48)</sup>のフェイスの片面が等方体，他面が異方体，コアが異方体からなるパネルの座屈理論式も有名である。

合板を主材とする sandwich panel の最もオーソドックスな構成は現在の所，フェイスに合板，コアに軽量材，すなわちフェイス：異方体，コア：異方体または等方体という形であるが，今後はむしろフェイスに金属板その他を，コアに合板，すなわちフェイス：等方体，コア



第6図 Sandwich panel の圧縮座屈係数<sup>54)</sup>の1例

：異方体の構成へ移る可能性が多い。1950年以降にはこのタイプのパネルについての研究が目立っている。たとえば MARCH<sup>49)</sup> は圧縮座屈荷重と垂直荷重の組合せ、NORRIS<sup>50)</sup> はフェイスの厚さが異なる場合の圧縮座屈、また KIMEL<sup>51, 52)</sup> は圧縮座屈荷重と曲げモーメントの組合せの場合について座屈理論式を求めている。

1964年 ZAHN<sup>53)</sup> は等方体フェイスと異方または等方体コアからなるパネルの荷重辺が単純支持、他辺がビームで支持されている場合の圧縮座屈につき、また KUENZI<sup>54)</sup> はフェイスが等方体か異方体かまたはその組合せ、コアが異方体または等方体からなる各種のパネルが圧縮荷重をうける時の座屈係数の図表123枚を総括して発表している。第6図にその1例を示した。

フェイス：合板，コア：段ボール構成の sandwich panel は北米において住宅用として市場性が高いが，JENKINSON<sup>55)</sup> は最近この種のパネルについて座屈係数の理論式を導出している。この外，sandwich cylinder の座屈については，MARCH<sup>56)</sup>，RAVILLE<sup>57)</sup>，NORRIS<sup>58)</sup> などの研究がある。

平面構造部材としての sandwich panel は stressed skin panel について，とくにプレハブ部材として市場にあらわれたが，この材料の長期曝露のいきた資料を求めるため，アメリカ林産試験場において1947年にモデルハウスが作られた。フェイスは 0.5mm のアルミ板，合板，単板あるいは resin paper overlay 合板，コアはフェノール樹脂含浸ハネカムまたは段ボールで両者の接着にはフェノール樹脂を用い，垂直パネルは厚さ 2~3'，屋根パネルは 4' で，それぞれ 20psf の風荷重および 25psf の等分布荷重に耐えるように設計され，外面は大部分アルミまたはチタニウムペイントで塗装された。各パネルは建築後約 15 年間，その保温性，反り，外観を調査すると共に，1962年 1 部を取外して剛性，曲げ強度および接着試験など

が行なわれた<sup>59)</sup>。その結果の概要をのべると

(1) ハネカムコアは熱損失がやや大きいから寒冷地ではパネルの厚さをますか、foam type のコアまたは接着剤を使用する必要がある。

(2) 接着力に異状はなかつた。

(3) 反りは実用上問題にする必要はない。

(4) 合板フェイスパネルは、反りと剛性および強さがとくにすぐれ、曲げ強さは設計値の16倍もあつた。

(5) アルミフェイスパネルは剛性に経時変化は無かつたが、強度で約30%の低下をみた。これは主にフェイスとコアの接着不良によるものと思われる。しかしこの場合でも設計値の約5倍であつた。

## VI 接着層の耐久性

構造部材の接着層に要求される重要な性質はその耐候性、疲労あるいはクリープなどであろう。これについての詳しい文献は専門誌にゆづることとして、ここでは最近の研究の主なものをあげると、1960年 SELBO<sup>60)</sup> はフェノール・レゾルシノール樹脂およびレゾルシノール樹脂で接着され、適当に防腐処理された集成材は、きわめて苛酷な条件に対しても安全であり、12年の曝露に対しても接着力の劣化や剥離はほとんど認められないが、カゼイングルー接着集成材は乾燥、乾熱にはよいが、室内曝露の場合でも乾湿繰返しには安全でないことを報告しているが、この結論は合板部材に対しても同様であろう。MOSLEMI<sup>61)</sup> はカゼイングルーのせん断疲労試験を行ない、 $10^7$  サイクルにおける時間強度が約25%に低下すること、また GILLWARD<sup>62)</sup> はブナ合板の疲労試験を行ない、その疲労強度は他樹種合板より低い、プライ数がますとその差がなくなること、集成材では欠点が再分配されるため疲労度が少ないことを見出している。極めて現場的な報告としては PAGE<sup>63)</sup> は高含水率材の接着には接着面を flame drying すると効果的であると報じている。また石原ら<sup>64)</sup> は曲げモーメントをうける接着層の応力分布を、エポキシ樹脂の光弾性解析結果を参考にして、脆性塗膜法により解析すると共に、尿素樹脂、フェノール系樹脂による接着層の繰返し平面曲げの S-N 曲線を求め、かつその空隙充填性と疲労性について実験を行ない、繰返し疲労に対してもフェノール樹脂の空隙充填性がきわめてよいことを報告している。

尿素樹脂の老化性は構造部材はもちろん、非構造材料に対しても大きな影響を与えるが、BLOMQUIST ら<sup>65)</sup> は尿素樹脂を基体としてメラミン、レゾルシノールおよびパラフォルムで増強した接着剤による poplar, birch, Douglas fir 合板についてサイクリックテスト、12年曝露後の剥離性、7年、12年曝露後の接着せん断試験などを行ない、メラミン樹脂20%、レゾルシノール樹脂10%の増強が最もよい結査を示したが、もちろんメラミン樹脂単体より劣ることを報告している。

合板と素材の接着層が乾湿繰返しによる応力をうけた場合の疲労も、接着構造部材に直接関連する重要な問題である。KRUEGER ら<sup>66)</sup> は rigid adhesive (レゾルシノール系) と flexible adhesive (エポキシ系) を用いた接着層を温度 80°F、湿度それぞれ30%と97%の繰返し条件を与えた場合、後者が前者にまさること、また素材の比重と合板フェイスの性状や繊維角度がサ

イクリックテストによる接着強度に大きく影響することなどを見出している。桜田ら<sup>67)</sup>はわが国市販のフェノール・タイプ I, メラミン・タイプ I ラワン合板について weatherometer ならびに屋外曝露試験を行い, メラミン合板は屋外曝露 3 年でほとんど接着力を失うのに対し, フェノール合板の接着力低下は比較的少ないが, フェイスの損傷がいちぢるしく, 合板自体が脆弱になると報じている。また GILLESPIRE<sup>68)</sup> はフェノール, メラミン, レゾルシノールおよび尿素樹脂接着剤によるジョイントに対して, accelerating aging factor として冷水浸漬, 沸騰水浸漬, 乾燥, 減圧浸漬のサイクルによる水分, 温度, 伸縮の繰返しが長時間耐久性の尺度となるとして, 接着せん断力の対数が時間と直線的関係にあること, 温度が木材を劣化させる結果, せん断強度が低下することおよび吸水が乾燥よりも著しく接着力に影響することを見出している。Cross linking polyvinyl acetate は boil shear resistance にすぐれ, flexible なために, 接着層の応力集中が少なく, せん断強度, 木破率の高い外装用接着剤として発展しているが, KREIBICH ら<sup>69)</sup>はこの接着剤とフェノール・レゾルシノール樹脂による接着層のクリープ試験を行い, KRUEGER ら<sup>70)</sup>は構造用の flexible adhesive の素材間接着層の基礎的性質として stress relaxation, クリープ挙動, 剛性などに関して報告している。

## VII Nail Glued Joint, Gusset

Box beam web の接着, 後出のガセットの接着あるいは hyperbolic paraboloid roof の接着などは, 多くの場合現場的接着工法を必要とするから, 釘打ちによつて接着に必要な圧縮力を与える, いわゆる nail gluing による joint の強さについての資料が必要で, 最近ようやくこの方面の基礎研究に手がつけられはじめた。

まず DOYLE<sup>71)</sup> は Douglas fir 素材に 5/8" の Douglas fir 合板の表層繊維をいろいろ傾斜させて, フェノール・レゾルシノールあるいはレゾルシノール樹脂により釘接着したジョイントを, 13ヶ月間室内, 室外に放置して, せん断試験を行ない,

(1) ジョイントはすべて合板の破壊によつて破損し, 表層繊維が素材のそれに 0°, 90° の場合は合板のせん断破壊が支配的であつた。

(2) 室内に放置したものは対照試片より 2~3% の強度低下を示した。

(3) 室外に放置したものおよび平衡含水率が 6% と 18% の繰返しをうけたものは, いずれも 16% の強度低下を生じた。

(4) 素材含水率が 12% の場合も 18% の場合もジョイントの強さに変りはない。

(5) 破壊荷重の 25% の荷重を 13 カ月間うけた後のジョイントには強度低下はみられない。ことなどを明かにした。

この種の接着工法では, 接着面積の変化に伴う接着力の変動を把握しておく必要があるが, KALINA<sup>72)</sup> はトラスの合板ガセットの接着設計資料として, ジョイントの接着面積と接着力の関係を実験的に求め, これから許容接着力のそれを導出している。合板ガセットを直接対象とした研究としては CURTIS<sup>73)</sup> のそれが有名である。CURTIS の 2 つの報告の内後者は 22 種の釘接着合板ガセットジョイントについて, frame design に必要なガセットの寸法や厚さを決定する方法を求め, SUDDARTH<sup>74)</sup> も素材と合板ガセットジョイントの接着面積や自由辺の座屈などについて論じている。このほか, SEGERLIND<sup>75)</sup> はガセットの接着層の応力とジョイントの強さ

について報告し、Pos<sup>76)</sup> や RADCLIFFE<sup>77)</sup> の報告もあるが、残念ながら筆者はまだこれらの文献を見る機会をえていない。

ガセットを釘接着した屋根トラスや桁についての試験は古くから沢山報告されている。

まず LUXFORD ら<sup>78)</sup> はレゾルシノール樹脂による接着ガセットと釘打ちガセットをもつ屋根トラスの上弦材に 35psf, 下弦材に 20psf の荷重を加え, 30日間湿度80%と20%の繰返しを与えた後, 破壊試験を行ない次の結論をえている。

(1) 釘打ちガセットは1部はがれたが大体においてよい。

(2) 接着ガセットははるかに剛性にとみ, 乾湿繰返し後のトラスの撓みは, 繰返し前の釘打ちトラスのそれより少ない。

(3) 接着トラスは乾湿繰返し後剛性は僅かに低下, 強度はかなり低下するが, それでも design value の数倍は強い。

(4) 接着トラスは突然破壊するが, 釘打ちトラスは破壊が近づくと変形が大きくなる。

(5) 釘接着トラスは接着トラスにほぼ近いと思われるが, 検討を要する。

1957年 PEDERSON<sup>79)</sup> は釘接着合板ウェブからなる桁について, また PERCIVAL<sup>80)</sup> は釘接着屋根トラスについて報告し, 1958年に KOLB<sup>81)</sup> はせん断試片, 3層接着ビーム, I形ビームおよび集成材ビームについて釘接着実験を行い

(1) 釘打ちによつてえられる圧縮力は樹種によつて違う。

(2) 小試片によるせん断試験では釘接着は明かに接着におとる。

(3) しかし, 上記各ビームの曲げ試験では素材の含水率を12~18%に調整し, 注意深く釘打ちすればよい結果がえられる。

ことを報告している。

内装用構造部材の接着にカゼイングルーを使用する時の可否については, 古くから賛否両論があるが, PERCIVAL<sup>82)</sup> は釘接着合板ガセットをもつ各種の実物大屋根トラスに 40psf (4' の積雪の design load) の荷重を加え, 1~2年室内に静置後測定した結果, カゼイングルーは通気のない乾燥した場所では充分信頼しうるが, 乾湿をくりかえす場所では内装用としても問題があると結論している。この外 SCHEUNERT<sup>83)</sup> は接着および釘接着した複合梁の撓みの許容応力について, RADCLIFFE らは釘接着 I 形合板ビームの強度<sup>34)</sup>やあるいは実物大屋根トラスに金属ガセット, 釘接着合板ガセットを用いた場合の比較試験<sup>35)</sup>を行ない, 合板ガセットの優秀性を示し, また MOE<sup>86)</sup> も釘接着合板ガセットによる屋根トラスの強度試験を行ない, その design value を求めており, PNEUMAN の合板ガセットをもつ King post truss<sup>37)</sup> や Rigid frame joint<sup>88)</sup> の研究などもある。

アメリカ林産試験場が合板ガセットをレゾルシノール樹脂で接着した King post truss, W-truss を3年間, nail glued joint を4年間戸外曝露した結果<sup>89)</sup>によると

(1) King post truss は3年間の戸外曝露で剛性, 強度低下を生じない。

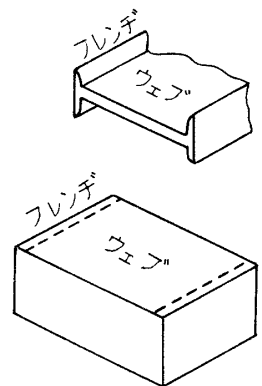
(2) W-truss は強度においてわずか, 剛性において約10~15%低下する。

(3) Nail glued joint の rolling shear strength は4年曝露で約10%低下した。また圧縮力を与えるために用いた釘はせん断強度にはほとんど影響を与えない。

以上建築部材の立場から、合板の座屈および2, 3の関連要素をとりあげてみたが、以下建築様式の立場からこれらを眺めてみよう。

## VIII Plywood Diaphragm

最近構造用合板界に **diaphragm construction** という言葉がよく出てくる。これは耐風、耐震構造の研究から生れた考え方で、American Plywood Association が関係方面の協力をえて1950年代に開発したものである。すなわち建物の垂直パネル、床パネル、屋根パネルなどがそれぞれ1枚の diaphragm からなり、これらが強固に結合され、例えば第7図の模式図で屋根パネルを考える時、これは垂直パネルをフレンヂとする大きな水平梁のウェブであり、全体としてせん断をうけもち、フレンヂパネルに曲げをもたせようとするものである。



第7図

実際の diaphragm では合板が wood frame と組合せて使用されるが、本質的には frame は単に合板同志の edge joint を完全にするためまたは stiffener としての意味が大きい。この点が在来の壁体と違う点である。アメリカの地震頻発州カリフォルニアでは、1階建の学校や工場では plywood roof diaphragm が近年他の屋根材料を駆逐していると報ぜられている。Diaphragm 理論の発展と共に、木質の **Folded plate roof** (折板屋根) も急速に建築界に出現している。これは一見普通の屋根と変らないが、両斜面が一体となつた逆V字形で、建物全長をそのままスパンとする plate girder の応用的構造である。普通逆V字形がいくつか連続して屋根を構成する場合が多い。斜面には stressed skin panel または sandwich panel, 上下弦材には主として集成材が、それぞれ、ウェブおよびフレンヂの役目をする。

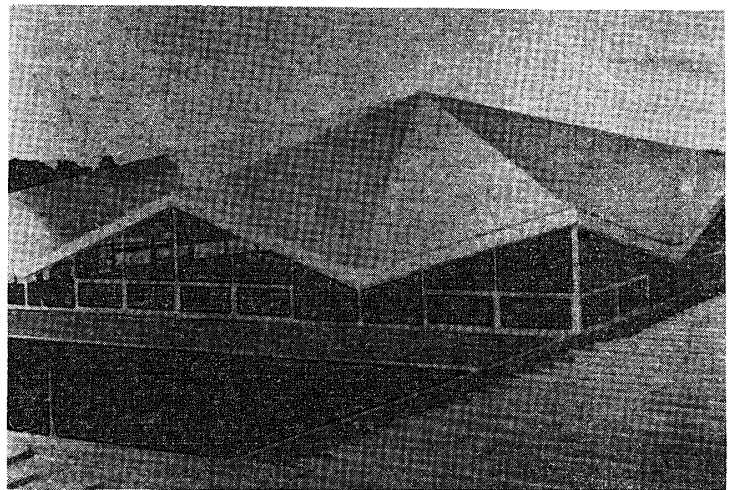


写真4 Shropshire (英) の幼稚園にある Assembly Hall の folded plates roof (Wood, 29, (6), 35, (1964))

Folded plate の設計については BROWN<sup>90)</sup> の報告がある。写真4はこのタイプの変形で、radial folded plates roof とよび、三角形のパネルは  $4 \times 1\frac{1}{2}$ '' のフレームに  $\frac{3}{8}$ '' 厚の Douglas fir 合板を接着したプレハブパネルである。

この頃から構造用合板の利用はその第3期にはいりつつあるとみることが出来る。

## IX Shell Construction

曲面板は平面板より著しく高い剛性と強度をもち、その構造物が美的感覚にアピールするこ

とから、近年薄肉の曲面からなる shell construction の理論とその応用が急速に発展している。

木質材料の shell construction に関する研究は非常に少ないが、以下主なものを拾ってみる。

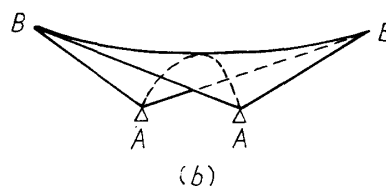
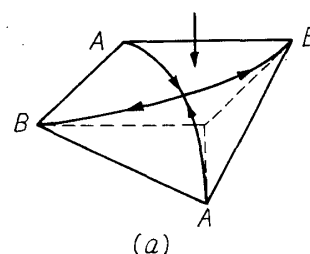
## 1. Plywood arch roof

円筒合板の座屈はすでに1940年代の後半からかなり研究されており<sup>91)</sup>、そのデザインに関しては BROWN ら<sup>92)</sup>のレポートや APA の design spec.<sup>93)</sup> などがある。Sandwich cylinder の文献についてはすでに紹介した。

合板アーチ屋根が建築界に流行しはじめたのはここ数年前からであり、とくに連続アーチ屋根が好まれている。もつばら stressed skin curve panel, sandwich curve panel が用いられる。写真5はカナダのバンクーバー付近のガソリンスタンドの合板アーチ屋根で厚さ  $1\frac{1}{4}$ " の湾曲集成材フレームの両面に  $1/2$ " 厚の成形合板を接着した stressed skin panel type, この上に insulation board をはり mineral roofing で仕上げてある。ビームは  $7 \times 26$ " 集成材である。



写真5 ガソリンスタンドの合板アーチ屋根、曲面のスパン約14呎、長さ15呎、桁は集成材 (Wood, 27, (1), 49, (1962))



第8図

## 2. Hyperbolic Paraboloid

Hyperbolic paraboloid (H.P.) は矩形板の相対する2辺を直線のまま、その伸びを許して第8図aのように回転した時に生ずる曲面で、その形が魅力的であり、理論、設計が簡単で、建築費が安いと、アメリカやイギリスでとくに好まれている屋根構造である。

1つの対角線は上に凸なパラボラで、鉛直荷重に対して、このパラボラに平行な方向では単純圧縮応力が、また他の対角線は上に凹で、これに平行な方向では単純引張応力が生ずるため、シエルは普通2プライまたはそれ以上として各プライ直交させる。普通3~4プライが多い。素材を用いた方が経済的なためストリップをさねはぎした各プライを直交、釘接着する場合が多いが、合板または成形合板を用いた方が剛性と強度においてはるかに秀れている。

H.P. に関する最近の研究として、STRODE ら<sup>94)</sup>は2プライ合板で作った厚さ  $1/4$ " の2枚の



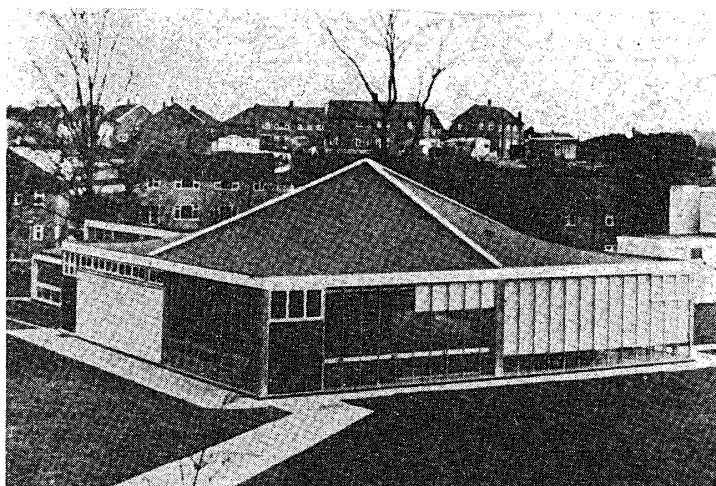


写真6 Hertfordshire (英) の小学校体育館の hyperbolic paraboloid roof  
(Wood 30, (9), 40, (1965))

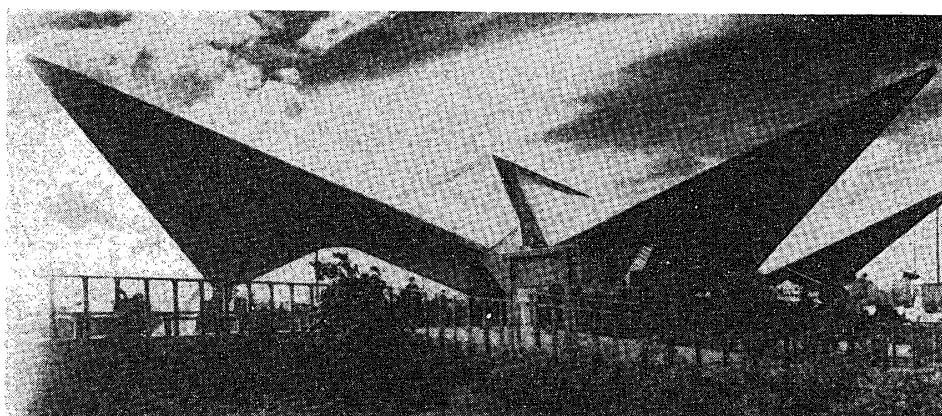


写真7 Portland (米) にたてられた Oregon 州100年祭記念の hyperbolic paraboloid roof construction (F. P. J. 10, 431, (1960))

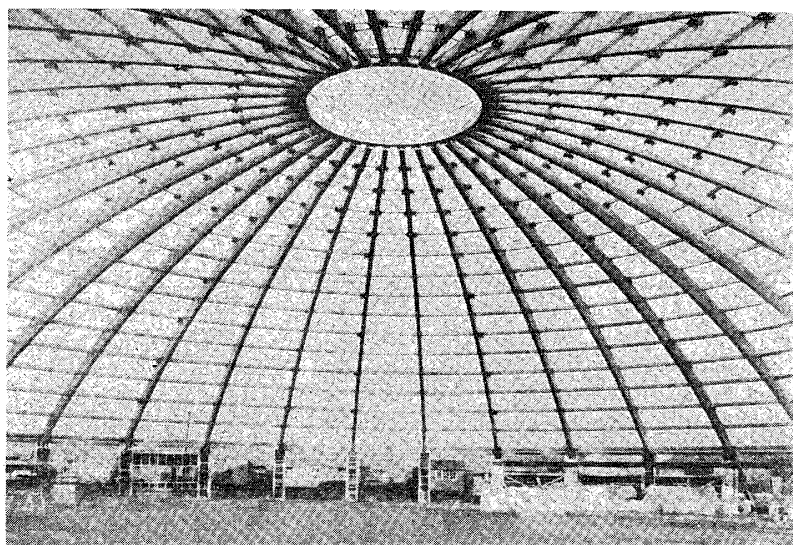


写真8 集成材リブよりなるドームタイプのスポーツセンター、リブは white wood  
レゾルシノール樹脂接着 (Wood, 29, (5), 39, (1964))

H.P. シェルの破壊試験を行ない、設計のための資料を求め、TOTTENHAM<sup>95)</sup> や LEE ら<sup>96)</sup> も同様な実験を行なっている。写真6はイギリス Hertfordshire の小学校の集会場兼体育館で、屋根はストリップの本ざねつぎ、2プライ釘接着、縁材は集成材、写真7はアメリカオレゴン州ポートランド市で州の100周年記念にたてられた H.P. roof construction で屋根は 1×6'' の Douglas fir 板材を直交2プライに釘接着、縁材は 3×9'' 集成材を屋根板の上下に釘接着したもので、その長さ 56' である。

### 3. Dome

直交異方体の球殻理論は最近ようやく始められたばかりで、研究報告もほとんど無い。したがって球殻理論に基づく木製の dome construction はまだ建築界にあらわれていないようであるが、diaphragm を用いた多面体形ドームはすでに建設されている。写真8はイギリス

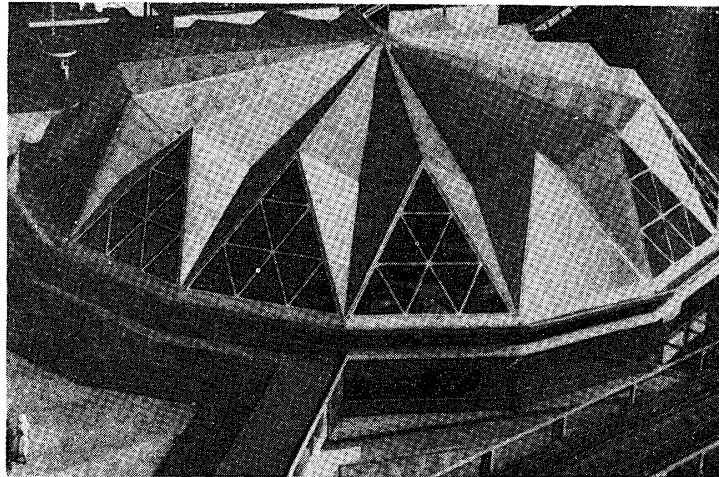


写真9 16個の folded plate よりなる shell construction, 直径約109呎  
(Wood, 26, 484, (1961))

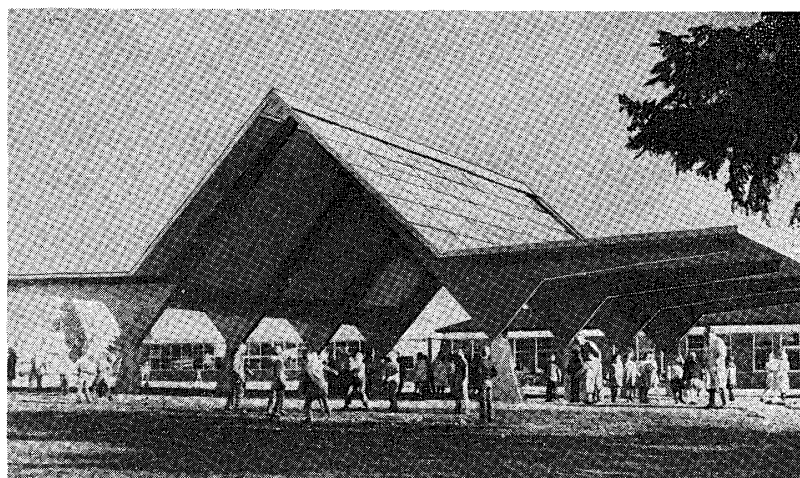


写真10 Washington 州(米)の学校にたてられた play shelter (Wood, 28, 134, (1963))  
屋根桁、翼桁は集成材フレンチよりなるボックスビームで両者はハンチで大きな三角形合板ガセットで結合されている。屋根は Stressed skin panel

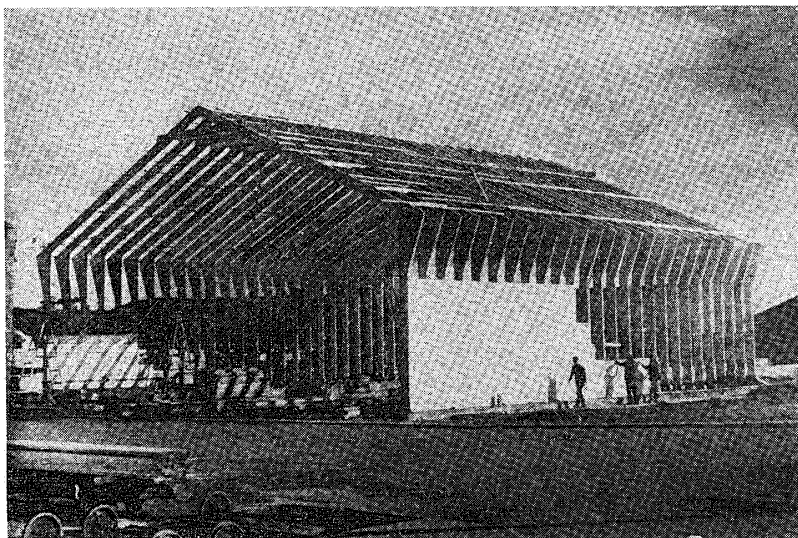


写真11 Belfast (英) に建てられた合板ガセット・アーチ型倉庫 (Wood, 29, (1), 34, (1964))  
スパン65呎、ハンテとクラウンには Douglas fir 合板ガセットが釘接着されている

Newcastle-Upon-Tyneの学校に作られた集成材リブによるスポーツセンターで、地上直径204', 高さ 40', リブは巾 8'', 高さ 10~26'' の white wood 集成材であるが、将来合板の球殻理論とその応用の発展に伴い、この種の集成材リブの数が次第に減少して、完全な dome shell construction になる日も、そう遠くはないと思われる。写真9は folded plate によるドーム形屋根で、各折板は4枚の三角形パネルからなる。パネルは 6×4'' と 4×2'' の集成材フレームの両面に、厚さ 3/4'', 巾 4'' の板を斜め張りしたもので、釘接着によるプレハブパネル。各パネルはボルト結合されている。

以上建築部材として合板の座屈を中心に 2, 3 の関連因子をとりあげ、これを利用した欧米諸国の各種建築様式を紹介したが、ここでひるがえつてわが国の斯界における合板の利用状況を眺めるとき、かろうじて欧米におけるそのれい明期に到達しているにすぎないことが痛感される。わが国の合板工業界がすぐれた研究陣と製造技術をもちながら、なぜ構造部材へ進出できないのであろうか？。それには勿論単に技術だけでは解決できぬ多くの複雑な問題が介在しているであろうが、合板界が今後さらに飛躍的發展を計るために、1日も早くこれらの問題を解決されんことを切望する次第である。

#### 参 考 文 献

- 1) SAVART, F., Mem. Acad. Fr. 9 (1830).
- 2) MARCH, H. W., U. S. For. Prod. Lab., No. R1503 (1944).
- 3) HEARMON, R. S. F., The Elasticity of Wood and Plywood (London) (1948).
- 4) PRICE, A. T., Philos. Trans., A 228, 1 (1928).
- 5) BALABUCH, L., Aeronaut. Engng, U. S. S. R. 11, 19 (1937).
- 6) MARCH, H. W., 例えば Physics. 7, 32 (1936).
- 7) SMITH, C. B., 例えば U. S. For. Prod. Lab, Mimeo, 1510 (1944).
- 8) SMITH, R. C. T., 例えば Rep. Aust. Coun. Aeronaut. No. 12 (1944).

- 9) MARCH, H. W., U. S. For. Prod. Lab., No. 1316, 1316-A, -B (1942).
- 10) TIMOSHENKO, S. P., GERE, J. M., Theory of Elastic Stability (N. Y.).
- 11) MARCH, H. W., U. S. For. Prod. Lab., No. 1316-C, -F (1943).
- 12) NORRIS, C. B. and A. W. VOSS, U. S. For. Prod. Lab., No. 1316-D (1943).
- 13) NORRIS, C. B. and A. W. VOSS, U. S. For. Prod. Lab., No. 1316-E (1943).
- 14) NORRIS, C. B. and A. W. VOSS, U. S. For. Prod. Lab., No. 1316-G (1943).
- 15) VOSS, A. W., C. B. NORRIS and J. PALMA JR., U. S. For. Prod. Lab., No. 1316-H (1945).
- 16) NORRIS, C. B., A. W. VOSS and P. F. MCKINNON, U. S. For. Prod. Lab., No. 1316-I (1945).
- 17) RINGELSTETTER, L. A., U. S. For. Prod. Lab., No. 1316-J (1949).
- 18) ANC SUBCOMMITTEE, L. A. Anc-18, Bull., Design of Wood Aircraft structures (1951).
- 19) WHYTE, R. A., For. Prod. J., **12**, (2) (1962).
- 20) 大熊幹章：木材誌**12**, 2, 71 (1966).
- 21) SMITH, C. B., T. B. HEEBINK and C. B. NORRIS, U. S. For. Prod. Lab., No. 1557 (1946).
- 22) HEEBINK, T. B., H. W. MARCH and C. B. NORRIS, U. S. For. Prod. Lab., No. 1553 (1946).
- 23) HEEBINK, T. B. and C. B. NORRIS, U. S. For. Prod. Lab., No. 1553-A (1946).
- 24) SMITH, C. B. and L. A. RINGELSTETTER and C. B. NORRIS, U. S. For. Prod. Lab., No. 1553-B (1947).
- 25) NORRIS, C. B. and L. A. RINGELSTETTER, U. S. For. Prod. Lab., No. 1553-C (1948).
- 26) NORRIS, C. B., W. J. KOMMERS and P. F. MCKINNON, U. S. For. Prod. Lab., No. 1800 (1948).
- 27) TRAYER, G. H., U. S. For. Prod. Lab., No. R1025 (1934).
- 28) TRAYER, G. H., U. S. For. Prod. Lab., No. R896 (1929).
- 29) ANDERSON, L. O. and J. A. LISKA, U. S. For. Serv. Res. Paper. FPL 16, Aug. 1964.
- 30) 山井, 高見, 西原, 井上, 近藤, 中井：林誌研報**187** (1966).
- 31) LEWIS, W. C., T. B. HEEBINK, W. S. COTTINGHAM and E. R. RAWLEY, U. S. For. Prod. Lab., No. 1318-B (1943).
- 32) LEWIS, W. C., T. B. HEEBINK, W. S. COTTINGHAM and E. R. RAWLEY, U. S. For. Prod. Lab., No. 1318-C (1944).
- 33) LEWIS, W. C., T. B. HEEBINK and W. S. COTTINGHAM, U. S. For. Prod. Lab., No. 1318-D (1944).
- 34) WITHEY, M. O., W. S. COTTINGHAM, E. R. RAWLEY, U. S. For. Prod. Lab., No. 1318 (1952).
- 35) LEWIS, W. C., T. B. HEEBINK and W. S. COTTINGHAM, U. S. For. Prod. Lab., No. 1318-E (1944).
- 36) LEWIS, W. C., T. B. HEEBINK W. S. COTTINGHAM, U. S. For. Prod. Lab., No. 1513 (1944).
- 37) 高見, 川口：木材誌**7**, 101, **7**, 264 (1961).
- 38) SONNTAG, G., Holz-zbl., **82**, (86), 1073 (1956).
- 39) STÖY, W., Holz als Roh- und Werkstoff, **16**, 274 (1958).
- 40) LUXFORD, R. F., U. S. For. Prod. Lab. No., R1099 (1936).
- 41) Newlin, J. A., U. S. For. Prod. Lab., No. R1220 (1940).
- 42) MÖHLER, K., G. ABDEL-SAYED, and J. EHLBECK, Holz als Roh- und Werkstoff, **21**, 328 (1963).
- 43) HEYER, O. C. and R. F. BLOMQUIST, U. S. For. Serv. Res. Paper FPL 18, Dec. 1964.
- 44) MARCH, H. W. and C. B. SMITH, U. S. For. Prod. Lab., No. 1525 (1945).
- 45) BOLLER, K. H., U. S. For. Prod. Lab., No. 1525-A, -D, -E (1947).
- 46) BOLLER, K. H. and C. B. NORRIS, U. S. For. Prod. Lab., No. 1802 (1949).
- 47) KUENZI, E. W. and W. S. ERICKSEN, U. S. For. Prod. Lab., No. 1560 (1951).
- 48) ERICKSEN, W. S. and MARCH, H. W., U. S. For. Lab., No. 1583-B (1950).
- 49) MARCH, H. W., U. S. For. Prod. Lab., No. 1834 (1952).
- 50) NORRIS, C. B., U. S. For. Prod. Lab., No. 1854 (1956).
- 51) KIMEL, W. R., U. S. For. Prod. Lab., No. 1857 (1957).
- 52) KIMEL, W. R., U. S. For. Prod. Lab., No. 1859 (1956).
- 53) ZAHN, J. J. and S. CHENG, U. S. For. Prod. Lab. FPL, 019, Feb. 1964.
- 54) KUENZI, E. W. and C.B. NORRIS, U. S. For. Serv. Res. Note, 070, Dec. 1964.

- 55) JENKINSON, P. M. and E. W. KUENZI U. S. For. Serv. Res. Paper FPL, 25, May 1965.
- 56) 例えば MARCH, H. W. and E. W. KUENZI, U. S. For. Prod. Lab., No. 1830 (1952)., No. 1840 (1958).
- 57) RAVILLE, M. E., U. S. For. Prod. Lab., No. 1844 (1954)., No. 1844-A, -B (1955).
- 58) NORRIS, C. B, U. S. For. Prod. Lab., No. 1876 (1960).
- 59) ANDERSON, L. O. and L. W. WOOD, U. S. For. Serv. Res. Paper FPL, 12, May 1964.
- 60) SELBO, M. L., U. S. For. Prod. Lab., No. 2199 (1960).
- 61) MOSLEMI, A. A., For. Prod. J. **11**, 115 (1961).
- 62) GILLWARD, W., DFPA. Lab. Rep., No. 93 (1961).
- 63) Page, M. W., CISRO. Div. For. Prod. Techn. Paper No. 20 (1962).
- 64) 石原, 佐々木, 満久 : 木材研究 No. 31, Nov. 1963.
- 65) BLOMQUIST, R. E., For. Prod. J. **14**, 461 (1964).
- 66) KRUEGER, G. P. and R. E. BLOMQUIST, U. S. For. Serv. Res. Note, FPL, 076, Dec. 1964.
- 67) 桜田, 山口, 田村, 一瀬 : 木材工業**19**, 215 (1964).
- 68) GILLESPIRE, R. H., For. Prod. J., **15**, 368 (1965).
- 69) KREIBICH, R. E. and H. G. FREENIANN, Adhesive Age, **8**, (8) 29 (1965).
- 70) KRUEGER, G. P. and R. E. BLOMQUIST, U. S. For. Serv. Res. Paper, FPL' 21, Jan. 1965.
- 71) DOYLE, D. V., U. S. For. Serv. Res. Note, FPL, 042, June. 1964.
- 72) KALINA, M., Holz als Roh- und Werkstoff **23**, 395 (1965).
- 73) CURTIS, J. O., Ill. Agr. Exp. Sta. C812 (1959), B654 (1960).
- 74) SUDDARTH, S. K., Purdue Univ. Agr. Exp. Sta. Res. Bull. No. 727 (1961).
- 75) SEGERLIND L. J., Amer. Soc. Agr. Eng. Paper. No. 64-918 (1964).
- 76) Pos, J., 1962 Winter Meeting. Amer. Soc. Agr. Eng. Chicago, Ill. (1962).
- 77) RADCLIFFE, B. M. and H. GRANRM, Purdue Univ. Agr. Exp. Sta. Bull. Note, b13, 1954.
- 78) LUXFORD, R. F. and O. HEYER, U. S. For. Prod. Lab., No. 1992 (1954).
- 79) Pederson, J. H., Iowa State Coll. Doctoral thesis, (1957).
- 80) PERCIVAL, D. H., Sta. Bull. Ind. Agr. Exp. Sta. No. 649 (1957).
- 81) KOLB, H., Holz als Roh- und Werkstoff **16**, 28 (1958).
- 82) PERCIVAL, D. H., For. Prod. J., **9**, 21A (1959).
- 83) SCHEUNERT, A., CISRO. Div. For. Prod. Trans. No. 5277 (1960).
- 84) RADCLIFFE, B. M., Bull. Mich. Agr. Exp. Sta. **42** (3) (1960).
- 85) RADCLIFFE, B. M., Mich. State Univ. Agr. Exp. Res. Rep. 21 (1967).
- 86) MOE, J., Norck Tretern, Inst. Blindern. Medd., No. 17 (1961).
- 87) PNEUMAN, F. C., APA Lab. Rep., No. 91 (1960).
- 88) PNEUMAN, F. C., APA Lab. Rep. No. 96.
- 89) Anderson, L. O., Ford. Prod. J. **14**, 192 (1964).
- 90) BROWN, D. H., For. Prod. J. **13**, (1963).
- 91) 例えば MARC, N. W. and C. B. NORRIS, U. S. For. Prod. Lab., No. 1322, 1322-A, 1322-B (1943), No. 1529 (1945).  
KUENZI, E. W., U. S. For. Prod. Lab., No. 1514, 1562 (1948).
- 92) BROWN, D. H. and J. L. LEITZINGER, APA Lab., Rep. No. 77 (1959).
- 93) American Plywood Association, Design Method No. CP-8D (1964).
- 94) STRODE, W. and D. L. DEAN, Kansas Univ. Bull. Eng. Architect, No. 41 (1958).
- 95) TOTTENHAM, H., Civ. Eng. 53 (622), 389, (1958), 54 (635), 597 (1959).
- 96) LEE, I. D. G., B. T. KEAY K. and M. Payne, Civ. Eng. & Publ. Works. Rev. London, 57 (672), 909, 673 (1032), (1962).